

## 第3章 双馈异步风力发电机的运行理论

### 3.1 双馈异步风力发电机的系统结构

随着电力电子技术和微机控制技术的发展，双馈异步发电机（DFIG）在可再生能源的发电方式利用中得到了广泛的应用，特别是在风力发电领域。由于发电机的定子接电网、转子接交流励磁变换器，定、转子都参与了馈电，故被称之为“双馈”发电机。从运行特性来看，DFIG 兼有异步发电机和同步发电机的双重特性，因为其运行转速可以与由电网频率与电机极对数决定的同步转速不相同，应当被称为异步发电机；但从性能上看，又具有很多同步发电机的特点。例如，与同步发电机一样，DFIG 具有独立的转子励磁绕组，可对其功率因数进行独立调节，所以有交流励磁同步发电机、同步感应发电机、异步化同步发电机之称。实际上，它是具有同步发电机特性的交流励磁异步发电机，比同步发电机具有更多的优点。

同步发电机采用直流电流励磁，可变量只有幅值，只能用于无功功率的调节。DFIG 采用交流励磁，可变量有励磁电流的幅值、频率和相位。改变励磁电流频率可以实现变速恒频运行；改变励磁电流相位可使所建立的转子磁场在空间上有一个相应的位移，进而改变了发电机电势矢量与电网电压矢量之间的相对位置，也即调节了发电机的功率角。所以采取交流励磁方式不仅具有无功功率调节，还具有有功功率调节功能，控制上更加灵活。若采用矢量变换控制技术，就可综合改变转子励磁电流的相位和幅值，实现输出有功功率和无功功率的解耦控制。因此，DFIG 比同步发电机在功率调节上具有更大的优越性。

DFIG 具有的变速恒频运行能力，使它在以下几方面比同步发电机具有更为优良的运行性能：

#### 1. 可在原动机变速运行条件下实现高效、优质发电

有很多场合拖动发电机的原动机转速是在时刻变化的，如潮汐电站中水头的变化导致水轮机转速也变化；风力发电中风速的变化使得风力机转速也在变化；船舶与航空发电机的转速随着推进器的速度而变化。这些变速驱动的环境中如采用同步发电机作常规方式运行就无法实现恒频发电，而采用双馈异步发电机，则可通过调节转子励磁电流的幅值、频率与相位，在原动机

的变速驱动条件下也可输出恒频电能，特别在风电机组中可实现最大风能追踪所需的变速恒频运行，有效提高了 DFIG 的发电运行效率。

## 2. 能参与电力系统的无功功率调节，提高了电网系统的运行稳定性

现代风电系统的发展趋势是单机容量越来越大，送电距离日益增长，输电电压等级逐渐提高。此外，电网负荷变化率也越来越剧烈，经常会出现输电线路传输的有功功率高于其自然功率的工况，此时线路会出现过剩的无功功率，引起工频过电压、损耗增加，危及电力系统的运行安全。由于 DFIG 可以调节励磁电流的相位，能快速改变发电机运行功率角，从而使发电机能吸收更多无功功率，以此抑制电网电压的上升，进而提高电网电能质量、电力系统运行效率与稳定性。

## 3. 可实现发电机安全、快捷的柔性并网

常规同步发电机或异步发电机并网控制较为复杂，往往需要精确的转速控制和整步、准同步操作。而采用交流励磁的 DFIG 则可通过对转子的励磁控制，精确地调节发电机定子输出电压的频率、幅值、相位，使其满足并网要求，理论上可在任何速度下实现安全而快速的“柔性”并网。

可以看出，变速恒频运行能力是 DFIG 非常重要的运行特性和优势，是用作风力发电机的重要依据。

DFIG 风电系统结构和变速恒频运行原理可用图 3-1 来说明<sup>[115]</sup>。

DFIG 定子直接连接电网，转子通过三相励磁变换器进行交流励磁，电磁功率通过定子、转子双通道与电网进行交换。为了实现变速恒频运行，

当风速变化、发电机转速作相应变化时，应调节转子励磁电流的频率以保证定子输出频率恒定。根据电机学的原理，若要实现有效的机电能量转换，发电机定、转子旋转磁场必须保持相对静止，即要求转子旋转磁场相对于静止空间的转速（即转子转速与转子旋转磁场相对于转子的转速之和或之差）等于定子旋转磁场的转速。图中  $f_1$ 、 $f_2$  分别为 DFIG 定、转子电流的频率， $n_1$  为定子磁场的同步转速， $n_2$  为转子磁场相对于转子的转速， $n_r$  为转子本身的转速。稳定运行时各转速间有如下关系

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (3-1)$$

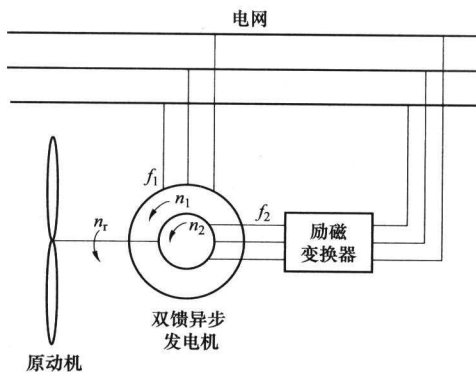


图 3-1 DFIG 系统结构和变速恒频运行原理框图

因  $f_1 = n_p n_1 / 60$  及  $f_2 = n_p n_2 / 60$ , 其中  $n_p$  为发电机极对数, 故有

$$\frac{n_p n_r}{60} + f_2 = f_1 \quad (3-2)$$

以此可知, 当发电机转速  $n_r$  变化时, 可通过调节转子励磁电流频率  $f_2$  来保持定子输出频率  $f_1$  恒定, 实现变速恒频发电运行。这样, 当发电机转速低于同步速时, DFIG 处于亚同步运行状态,  $f_2 > 0$ , 转子励磁电流产生的旋转磁场转向与转子转向相同, 发电机转子通过励磁变换器从电网输入转差功率; 当发电机转速高于同步速时, DFIG 处于超同步运行状态,  $f_2 < 0$ , 转子励磁电流建立的旋转磁场方向与转子转向相反, 转子绕组通过励磁变换器向电网输出转差功率; 当发电机转速等于同步速时, 即 DFIG 处于同步运行状态,  $f_2 = 0$ , 电网与转子绕组之间无功功率交换, 励磁变换器向转子提供直流励磁。

综上所述, 采取交流励磁的 DFIG 风电系统结构形式, 确保了变速恒频发电运行的实现。

## 3.2 双馈异步风力发电机的数学模型<sup>[115-119]</sup>

与一般三相交流电机一样, 采用三相相变量表述的双馈异步风电系统是一个高阶、多变量、非线性、强耦合的时变系统, 很难据此直接实现运行控制和进行系统分析与设计。如前所述, DFIG 的控制主要是针对其功率控制来进行, 为了实现其有功、无功功率的有效(解耦)控制, 可以把交流调速转动中的矢量变换控制技术移植到 DFIG 风电系统的控制之中, 即通过坐标变换将转子电流分解为有功与无功分量, 通过控制这两个转子分量电流来实施对 DFIG 的有功和无功功率的独立控制, 从而实现变速恒频发电运行的控制目标。矢量变换控制是借助于坐标变换实现的控制技术, 因此, DFIG 的运行分析、控制策略研究等应从建立不同坐标系中 DFIG 的数学模型开始。

### 3.2.1 三相静止坐标系中 DFIG 的数学模型

在讨论 DFIG 的数学模型时, 应先选定建立方程的正方向惯例。本书规定其定、转子绕组均采用电动机惯例, 即电压降的正方向与电流的正方向一致, 正值电流产生正值磁链(符合右手螺旋法则)。

为了便于分析和建模, 还常做如下的假设:

(1) 忽略空间谐波。设三相绕组对称, 在空间中互差  $120^\circ$  电角度, 所产生的磁动势沿气隙作正弦规律分布。

(2) 忽略磁路的非线性饱和, 认为各绕组的自感和互感与磁路工作点有关, 但都是与磁路工作点相关的恒值。

(3) 忽略铁心损耗。



(4) 不考虑频率变化和温度变化对绕组电阻的影响。

(5) 转子参数均经折算至定子侧, 折算后的定、转子绕组匝数相同。

在此假定下, 一台 DFIG 的等效物理模型可表达成如图 3-2 所示的绕组模型形式。图中, 定子绕组轴线 A、B、C 在空间静止、互差  $120^\circ$  对称分布; 转子绕组轴线 a、b、c 亦对称分布, 但随转子以角速度  $\omega_r$  在空间旋转; 定、转子绕组间的空间位置关系可用转子 a 相轴线和定子 A 相轴线间的空间位置角  $\theta_r$  来表示。这样, 三相坐标系中 DFIG 的数学模型可用如下方程组来描述。

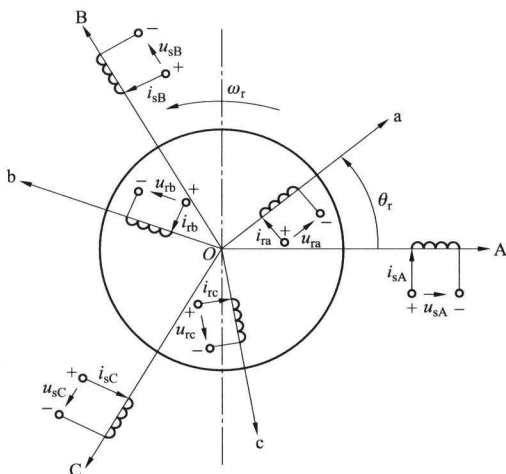


图 3-2 DFIG 等效物理模型

### 1. 电压方程

三相定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{sA} = R_s i_{sA} + \frac{d\psi_{sA}}{dt} \\ u_{sB} = R_s i_{sB} + \frac{d\psi_{sB}}{dt} \\ u_{sC} = R_s i_{sC} + \frac{d\psi_{sC}}{dt} \end{cases} \quad (3-3)$$

三相转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ u_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ u_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (3-4)$$

式中,  $u_{sA}$ ,  $u_{sB}$ ,  $u_{sC}$ ,  $u_{ra}$ ,  $u_{rb}$ ,  $u_{rc}$  分别为定、转子相电压 (瞬时值);  $i_{sA}$ ,  $i_{sB}$ ,  $i_{sC}$ ,  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$ ,  $i_{rc}$  分别为定、转子相电流 (瞬时值);  $\psi_{sA}$ ,  $\psi_{sB}$ ,  $\psi_{sC}$ ,  $\psi_{ra}$ ,  $\psi_{rb}$ ,  $\psi_{rc}$  分别为定、转子各相绕组磁链 (瞬时值);  $R_s$ ,  $R_r$  分别为定、转子绕组电阻。

为了简洁, 表示折算后量的上标 “’” 均省略。

令微分算子  $p = d/dt$ ，并将电压方程写成矩阵形式，则有

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + p\boldsymbol{\psi} \quad (3-5)$$

式中， $\mathbf{U} = [u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}, u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}]^T = [\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_r]^T$ ， $\mathbf{U}_s = [u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}]$ ， $\mathbf{U}_r = [u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}]$ ；

$$\mathbf{I} = [i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T = [\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_r]^T, \mathbf{I}_s = [i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}]^T, \mathbf{I}_r = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T;$$

$$\boldsymbol{\psi} = [\psi_{sA}, \psi_{sB}, \psi_{sC}, \psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}]^T = [\boldsymbol{\psi}_s, \boldsymbol{\psi}_r]^T, \boldsymbol{\psi}_s = [\psi_{sA}, \psi_{sB}, \psi_{sC}]^T, \boldsymbol{\psi}_r = [\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}]^T;$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

## 2. 磁链方程

矩阵形式的磁链方程可表示为

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_s^T \\ \boldsymbol{\psi}_r^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s^T \\ \mathbf{I}_r^T \end{bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{I} \quad (3-6)$$

$$\text{其中, } \mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix}; \mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr} + L_{lr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{lr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{lr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

式中， $L_{ms}$ 为与定子一相绕组交链的最大互感磁通所对应的定子互感值； $L_{mr}$ 为与转子一相绕组交链的最大互感磁通所对应的转子互感值，由于折算后定、转子绕组匝数相等，且各绕组间互感磁通都通过相同磁阻的主气隙，故可认为  $L_{ms} = L_{mr}$ ； $L_{ls}$ ， $L_{lr}$ 分别为定、转子漏电感。

值得注意的是式(3-7)中两个分块矩阵互为转置，且均与转子位置角  $\theta_r$  有关，其元素均为变参数，这是系统非线性的表现和根源。为了把变参数矩阵转换成常参数矩阵，必须进行相应的坐标变换。

将磁链方程式(3-6)代入电压方程式(3-5)，展开后得

$$U = RI + p(LI) = RI + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} = RI + L \frac{dI}{dt} + \omega_r I \frac{dL}{d\theta_r} \quad (3-8)$$

其中,  $p = d/dt$ ;  $LdI/dt$  为感应电动势中的变压器电动势项;  $\omega_r I (dL/d\theta_r)$  为感应电动势中的旋转电动势项, 其大小与转速  $\omega_r$  成正比。

### 3. 转矩方程

根据机电能量转换原理, 发电机的电磁转矩可表达为

$$T_e = \frac{1}{2} n_p \left[ I_r^T \frac{dL_{rs}}{d\theta_r} I_s + I_s^T \frac{dL_{sr}}{d\theta_r} I_r \right] \quad (3-9)$$

式中,  $n_p$  为电机的极对数。

将式 (3-7) 代入式 (3-9) 并展开, 得

$$T_e = -n_p L_{ms} \left[ (i_{sA} i_{ra} + i_{sB} i_{rb} + i_{sC} i_{rc}) \sin\theta_r + (i_{sA} i_{ra} + i_{sB} i_{rb} + i_{sC} i_{rc}) \times \sin(\theta_r + 120^\circ) + (i_{sA} i_{ra} + i_{sB} i_{rb} + i_{sC} i_{rc}) \sin(\theta_r - 120^\circ) \right] \quad (3-10)$$

式 (3-10) 是在磁路线性、磁动势在空间作正弦分布的假定下导出的, 但对定、转子电流随时间变化的规律 (波形) 未做规定, 即假设电流为瞬时值。因此, 该转矩表达完全适用于转子采用 PWM 变换器非正弦供电下的 DFIG 运行分析。

### 4. 运动方程

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{D}{n_p} \omega_r + \frac{K}{n_p} \theta_r \quad (3-11)$$

式中,  $T_L$  为风力机提供的驱动转矩;  $J$  为风电机组的转动惯量;  $D$  为与转速成正比的阻转矩阻尼系数;  $K$  为扭转弹性转矩系数。

通常假定  $D=0$ ,  $K=0$ , 则有

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3-12)$$

综合式 (3-8)、式 (3-10) 和式 (3-12), 再考虑

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3-13)$$

以此可构成一组三相坐标系中的 DFIG 数学模型。这是一个非线性、时变、强耦合的多变量系统方程, 必须通过坐标变换、特别是旋转坐标变换来实现变量解耦和简化, 才能适应线性控制策略的实施。旋转坐标变换中任意速旋转 dq 坐标系是一种可自由定义旋转速度的广义坐标变换系统, 可以用来简化坐标变换的运算。

## 3.2.2 任意速旋转坐标系中 DFIG 的数学模型

任意速 dq 坐标系是一个以任意角速度  $\omega$  在空间旋转的两相坐标系, 其 d 轴与两相静止  $(\alpha\beta)_s$  坐标系的  $\alpha_s$  轴、两相转子速旋转  $(\alpha\beta)_r$  坐标系的  $\alpha_r$  轴

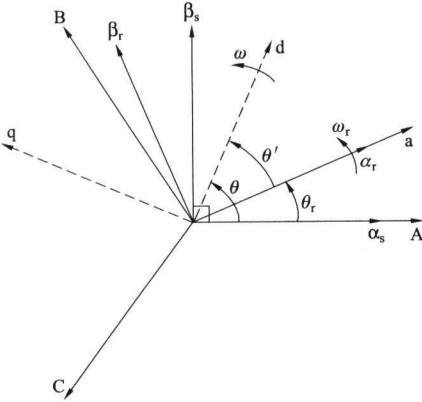


图 3-3 三相静止 ABC 坐标系、两相静止  $(\alpha\beta)_s$  坐标系、两相转子速旋转  $(\alpha\beta)_r$  坐标系和任意速  $\omega$  旋转 dq 坐标系间的空间位置关系

间的空间位置关系，以及  $\alpha_r$  轴与  $\alpha_s$  轴的空间位置关系如图 3-3 所示，即分别有

$$\begin{cases} \theta = \int \omega(t) dt + \theta_0 \\ \theta' = \int [\omega(t) - \omega_r(t)] dt + \theta'_0 \\ \theta_r = \int \omega_r(t) dt + \theta_{r0} \end{cases} \quad (3-14)$$

其中， $\theta_0$ 、 $\theta'_0$  和  $\theta_{r0}$  分别为  $\theta$ 、 $\theta'$  和  $\theta_r$  的初始位置角。当任意角速度分别设定为  $\omega(t) = \omega_1$ 、 $\omega_r$  和 0 时，任意速 dq 坐标系将被具体明确为两相同步速  $\omega_1$  ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $f_1$  为电网频率) 旋转 dq 坐标系、两相转子速  $\omega_r$  旋转

$(\alpha\beta)_r$  坐标系和两相静止  $(\alpha\beta)_s$  坐标系。

根据交流电机的坐标变换理论，从三相静止 ABC 坐标系到两相静止  $\alpha\beta$  坐标系的变换称为 **3s/2s 变换**，采用幅值恒定原则<sup>[120]</sup>的矩阵形式 3s/2s 变换关系式为

$$C_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

从两相静止  $(\alpha\beta)_s$  坐标系到两相同步速  $\omega_1$  旋转 dq 坐标系间的变换称为 **2s/2r 变换**，其变换矩阵为

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

式中， $\theta_1$  为 d 轴与  $\alpha_s$  轴之间的夹角， $\theta_1 = \omega_1 t + \theta_0$ ， $\theta_0$  为初始时刻 d 轴与  $\alpha$  轴之间的夹角； $\omega_1$  为同步电角速度。

根据式 (3-14) ~ 式 (3-16)，可求得三相定子（静止）ABC 坐标系、转子  $\omega_r$  速旋转 abc 坐标系至两相任意速  $\omega$  旋转 dq 坐标系间的变换矩阵，分别为

$$C_{ABCs/dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

$$C_{abcr/dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta' & \cos(\theta' - 2\pi/3) & \cos(\theta' + 2\pi/3) \\ -\sin\theta' & -\sin(\theta' - 2\pi/3) & -\sin(\theta' + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

利用以上两式，可将三相静止坐标系中的 DFIG 数学模型变换到两相任意速旋转 dq 坐标系中的数学模型，如图 3-4 所示。

假定定、转子三相绕组对称且不考虑中（零）轴分量，则两相任意速  $\omega$  旋转 dq 坐标系中 DFIG 数学模型可表示为

### 1. 磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (3-19)$$

式中， $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  分别为定、转子磁链的 d、q 轴分量； $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  分别为定、转子电流的 d、q 轴分量； $L_m$  为 dq 坐标系中定、转子同轴等效绕组间的互感， $L_m = \frac{3}{2}L_{ms}$ ； $L_s$  为 dq 坐标系中定子等效两相绕组自感， $L_s = L_m + L_{ls}$ ； $L_r$  为 dq 坐标系中转子等效两相绕组自感， $L_r = L_m + L_{lr}$ 。

值得注意的是，由于采取两相绕组等效替代三相绕组，定、转子同轴等效绕组间的互感  $L_m$  是原三相绕组中任意两相间最大互感（当轴线重合时）的 3/2 倍。由式（3-19）还可看出，由于互相垂直两轴之间没有耦合，互感磁链只存在于同轴绕组间存在。

### 2. 电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega\psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega\psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega - \omega_r)\psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega - \omega_r)\psi_{rd} \end{cases} \quad (3-20)$$

式中， $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  分别为定、转子电压的 d、q 轴分量。

### 3. 转矩和运动方程

电磁转矩的表达式为

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3-21)$$

运动方程与坐标变换无关，仍为式（3-11）。

这样，由式（3-19）～式（3-21）和式（3-11）完整地构成了任意速  $\omega$  旋转 dq 坐标系中 DFIG 的数学模型。

为了后续章节叙述方便，拟统一采用小写 a、b、c 表示三相变量，而用 s、r 来区分定、转子电磁量。

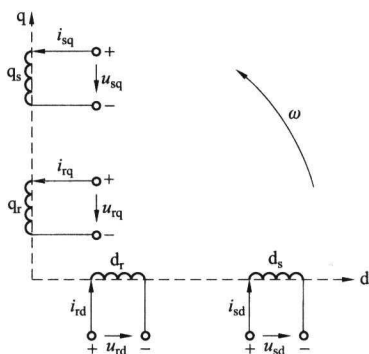


图 3-4 两相任意速  $\omega$  旋转 dq 坐标系中 DFIG 物理模型



### 3.3 双馈异步风力发电机的功率关系

DFIG 的运行控制主要是功率控制，特别是在最大风能追踪运行中实施的就是有功功率的有效控制，而无功功率的控制为确保电网电压稳定和满足系统无功功率需求时也是十分重要的控制内容和目标，因而必须对 DFIG 的有功、无功功率关系做出细致的分析。

#### 3.3.1 同步速 $\omega_1$ 旋转坐标系中 DFIG 风电系统的等效电路

将任意速旋转坐标系的旋转转速设定为  $\omega(t) = \omega_1$ ，则由式 (3-19) 和式 (3-20) 可得同步速旋转 dq 坐标系中矢量形式的 DFIG 电压方程和磁链方程，分别为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + d\psi_s/dt + j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r I_r + d\psi_r/dt + j\omega_{slip} \psi_r \end{cases} \quad (3-22)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (3-23)$$

式中， $U_s$ 、 $U_r$  分别为定、转子端电压矢量，且有  $U_s = u_{sd} + ju_{sq}$ ， $U_r = u_{rd} + ju_{rq}$ ； $I_s$ 、 $I_r$  分别为定、转子电流矢量，且有  $I_s = i_{sd} + ji_{sq}$ ， $I_r = i_{rd} + ji_{rq}$ ； $\psi_s$ 、 $\psi_r$  分别为定、转子磁链矢量，且有  $\psi_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}$ ， $\psi_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}$ ； $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r$  为转差电角速度。

根据以上两式可得矢量形式的 DFIG 等效电路，如图 3-5 所示。

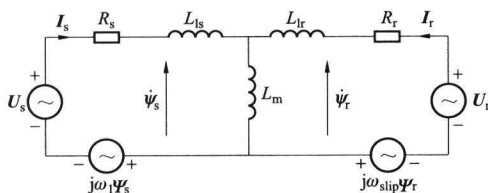


图 3-5 同步速  $\omega_1$  旋转 dq 坐标系中  
矢量形式 DFIG 等效电路

#### 3.3.2 同步速 $\omega_1$ 旋转 dq 坐标系中 DFIG 风电系统的功率表达

##### 1. 有功功率

由图 3-5 和式 (3-22)，可得 DFIG 向电网输出的总有功功率为<sup>[121]</sup>

$$\begin{aligned}
 P &= P_s + P_r = -\operatorname{Re}\left[\frac{3}{2}U_s \hat{I}_s\right] - \operatorname{Re}\left[\frac{3}{2}U_r \hat{I}_r\right] \\
 &= -\frac{3}{2}R_s |I_s|^2 - \frac{3}{2}R_r |I_r|^2 - \frac{3}{2}\operatorname{Re}\left[\frac{d\psi_s}{dt} \hat{I}_s + \frac{d\psi_r}{dt} \hat{I}_r\right] \\
 &\quad - \frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_1 \psi_s \hat{I}_s] - \frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_{\text{slip}} \psi_r \hat{I}_r] = P_{\text{loss}} + P_{\text{field}} + P_e
 \end{aligned} \quad (3-24)$$

式中  $\hat{I}_s$ 、 $\hat{I}_r$ ——定、转子电流矢量  $I_s$ 、 $I_r$  的共轭矢量；

$P_{\text{loss}}$ ——定、转子绕组总铜耗，即  $P_{\text{loss}} = -\frac{3}{2}R_s |I_s|^2 - \frac{3}{2}R_r |I_r|^2 = P_{\text{cus}} + P_{\text{cur}}$ ；

$P_{\text{field}}$ ——磁场储能变化引起的电磁功率，有  $P_{\text{field}} = -\frac{3}{2} \times \operatorname{Re}\left[\frac{d\psi_s}{dt} \hat{I}_s + \frac{d\psi_r}{dt} \hat{I}_r\right]$ 。

系数  $-\frac{3}{2}$  中负号是因为定、转子绕组均采用电动机惯例来定义功率的流向， $\frac{3}{2}$  是因为坐标变换采用了幅值恒定原则。

$P_e$  为 DFIG 定、转子输出总电磁功率，且有

$$P_e = -\frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_1 \psi_s \hat{I}_s] - \frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_{\text{slip}} \psi_r \hat{I}_r] = P_{\text{es}} + P_{\text{er}} \quad (3-25)$$

式中， $P_{\text{es}} = -\frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_1 \psi_s \hat{I}_s]$  为定子输出电磁功率； $P_{\text{er}} = -\frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_{\text{slip}} \psi_r \hat{I}_r]$  为转子输出电磁功率。将这两部分电磁功率按 dq 分量展开并代入式 (3-23) 关系，可得

$$\begin{aligned}
 P_{\text{es}} &= -\frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_1 \psi_s \overset{\text{共轭}}{\hat{I}_s}] = -\frac{3}{2}\omega_1 \operatorname{Re}[j(\psi_{\text{sd}} + j\psi_{\text{sq}})(i_{\text{sd}} - ji_{\text{sq}})] \\
 &= \frac{3}{2}\omega_1 (\psi_{\text{sq}} i_{\text{sd}} - \psi_{\text{sd}} i_{\text{sq}}) \\
 &= \frac{3}{2}\omega_1 [(L_s i_{\text{sq}} + L_m i_{\text{rq}}) i_{\text{sd}} - (L_s i_{\text{sd}} + L_m i_{\text{rd}}) i_{\text{sq}}]
 \end{aligned} \quad (3-26)$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{er}} &= -\frac{3}{2}\operatorname{Re}[j\omega_{\text{slip}} \psi_r \hat{I}_r] = -\frac{3}{2}\omega_{\text{slip}} \operatorname{Re}[j(\psi_{\text{rd}} + j\psi_{\text{rq}})(i_{\text{rd}} - ji_{\text{rq}})] \\
 &= \frac{3}{2}\omega_{\text{slip}} (\psi_{\text{rq}} i_{\text{rd}} - \psi_{\text{rd}} i_{\text{rq}}) \\
 &= \frac{3}{2}\omega_{\text{slip}} [(L_m i_{\text{sq}} + L_r i_{\text{rq}}) i_{\text{rd}} - (L_m i_{\text{sd}} + L_r i_{\text{rd}}) i_{\text{rq}}] \\
 &= \frac{3}{2}\omega_{\text{slip}} L_m (i_{\text{rd}} i_{\text{sq}} - i_{\text{rq}} i_{\text{sd}})
 \end{aligned} \quad (3-27)$$

从而 DFIG 输出总电磁功率为

$$\begin{aligned} P_e &= P_{es} + P_{er} = -\frac{3}{2}\omega_1 L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) + \frac{3}{2}\omega_{slip} L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \\ &= -\frac{3}{2}\omega_r L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \end{aligned} \quad (3-28)$$

根据以下恒等变换关系

$$\begin{aligned} L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) &= \frac{L_m}{L_s} \text{Im} [L_s \mathbf{I}_s \hat{\mathbf{I}}_r] = \frac{L_m}{L_s} \text{Im} [(L_s \mathbf{I}_s + L_m \mathbf{I}_r) \hat{\mathbf{I}}_r] \\ &= \frac{L_m}{L_s} \text{Im} [\boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_r] = -\text{Im} [\boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_s] \end{aligned} \quad (3-29)$$

则式 (3-28) 可改写为

$$P_e = -\frac{3}{2}\omega_r \frac{L_m}{L_s} \text{Im} [\boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_r] = \frac{3}{2}\omega_r \text{Im} [\boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_s] \quad (3-30)$$

稳态运行时定、转子磁场不发生变化,  $P_{\text{field}} = 0$ , 于是 DFIG 定子输出有功功率将为

$$P_s = -\text{Re} \left[ \frac{3}{2} \mathbf{U}_s \hat{\mathbf{I}}_s \right] \approx P_{es} + P_{\text{cus}} \quad (3-31)$$

由式 (3-24)、式 (3-26)、式 (3-27) 和式 (3-31), 可得 DFIG 转子输出有功功率为

$$P_r = P_{er} + P_{\text{cur}} \approx -\frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} P_s = -s P_s \quad (3-32)$$

式中,  $s = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1}$  为运行转差。

设由风力机输入 DFIG 轴上的机械功率为  $P_o$ , 在忽略机械损耗的条件下, 有

$$P_o \approx -P_e = -(1-s)P_{es} \quad (3-33)$$

$$P_{es} = \frac{P_e}{(1-s)} \approx -\frac{P_o}{(1-s)} \quad (3-34)$$

这样由式 (3-31) ~ 式 (3-34) 可得 DFIG 在亚同步速、同步速和超同步速运行时的功率流动关系图, 如图 3-6 所示。从图中可以看出: ① 转子仅提供转差功率, 相对于整个机组的额定容量其值较小; ② 转子励磁变换器必须具有能量双向流动的能力。

亚同步速和超同步速下运行时, DFIG 的有功功率流动情况还可以通过图 3-7 的电路拓扑作更为直观的图示说明, 图中  $P_i$  为包括励磁变换器在内整个 DFIG 风电系统的总有功功率输出。

## 2. 无功功率

若不考虑因磁场变化引起的无功功率, 则 DFIG 向电网输出的无功功率为

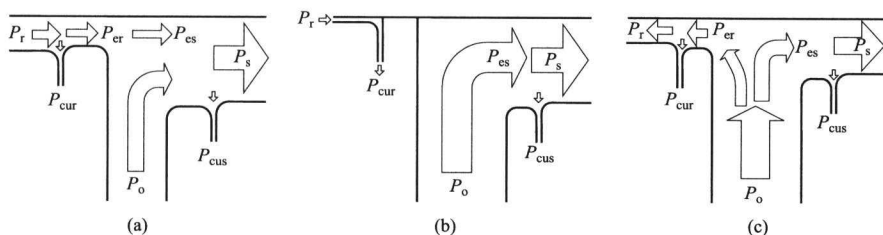


图 3-6 亚同步、同步、超同步速下运行时 DFIG 有功功率流动关系示意图

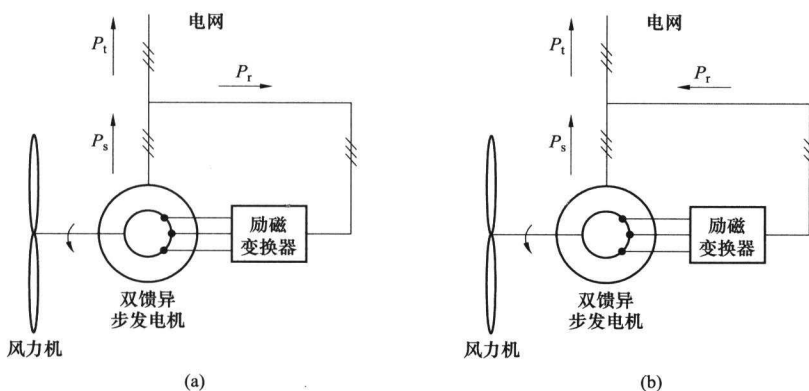
 (a) 亚同步速 ( $s > 0$ ); (b) 同步速 ( $s = 0$ ); (c) 超同步速 ( $s < 0$ )


图 3-7 亚同步和超同步速下 DFIG 有功功率流动关系

 (a) 亚同步速 ( $s > 0$ ); (b) 超同步速 ( $s < 0$ )

$$Q_s = -\frac{3}{2} \text{Im}[U_s \hat{I}_s] \approx \frac{3}{2} \text{Im}[j\omega_1 \psi_s \hat{I}_s] = -\frac{3}{2} \text{Re}[\omega_1 \psi_s \hat{I}_s] \quad (3-35)$$

DFIG 中  $Q_s$  的控制是通过对转子电流的控制来实现的, 故应给出采用转子电流的显式表达。根据定子磁链表达式 (3-23), 有

$$\mathbf{I}_s = \frac{1}{L_s} (\boldsymbol{\psi}_s - L_m \mathbf{I}_r) \quad (3-36)$$

其共轭矢量关系为

$$\hat{\mathbf{I}}_s = \frac{1}{L_s} (\hat{\boldsymbol{\psi}}_s - L_m \hat{\mathbf{I}}_r) \quad (3-37)$$

把式 (3-37) 代入式 (3-35) 中, 可得

$$\begin{aligned} Q_s &= -\frac{3}{2} \text{Re}[\omega_1 \boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_s] = -\frac{3}{2} \text{Re}\left[\omega_1 \boldsymbol{\psi}_s \frac{1}{L_s} (\hat{\boldsymbol{\psi}}_s - L_m \hat{\mathbf{I}}_s)\right] \\ &= -\frac{3}{2} \frac{\omega_1}{L_s} |\boldsymbol{\psi}_s|^2 + \frac{3}{2} \text{Re}\left[\omega_1 \frac{L_m}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s \hat{\mathbf{I}}_s\right] \end{aligned} \quad (3-38)$$



图 3-8 归纳了 DFIG 定、转子的功率性质与对应电压、电流矢量相位的关系, 其中图 3-8 (a) 表示定子有功功率  $P_s$ 、无功功率  $Q_s$  性质与定子电压矢量  $U_s$ 、电流矢量  $I_s$  相位的关系; 图 3-8 (b) 表示了转子有功功率  $P_r$ 、无功功率  $Q_r$  性质与转子电压矢量  $U_r$ 、电流矢量  $I_r$  相位的关系。

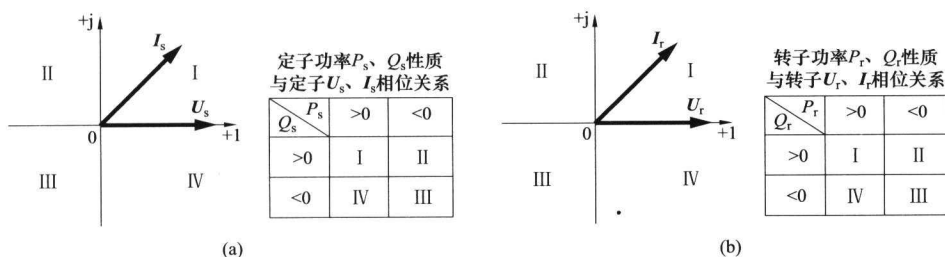


图 3-8 DFIG 功率性质和电压、电流矢量相位的关系

(a) 定子功率; (b) 转子功率

(1) 定子功率, 如图 3-8 (a) 所示。

1) 当  $I_s$  位于 I、IV 象限:  $P_s > 0$ , 有功功率从电网流入定子, DFIG 作电动机运行。

2) 当  $I_s$  位于 II、III 象限:  $P_s < 0$ , 有功功率从定子流入电网, DFIG 作发电机运行。

3) 当  $I_s$  位于 I、II 象限:  $Q_s > 0$ , DFIG 定子向电网输出感性无功功率。

4) 当  $I_s$  位于 III、IV 象限:  $Q_s < 0$ , DFIG 定子向电网输出容性无功功率。

(2) 转子功率, 如图 3-8 (b) 所示。

1) 当  $I_r$  位于 I、IV 象限:  $P_r > 0$ , 有功功率从电网流入转子, DFIG 作异步运行。

2) 当  $I_r$  位于 II、III 象限:  $P_r < 0$ , 有功功率从转子流入电网, DFIG 作超同步运行。

3) 当  $I_r$  位于 I、II 象限:  $Q_r > 0$ , DFIG 转定向电网输出感性无功功率。

4) 当  $I_r$  位于 III、IV 象限:  $Q_r < 0$ , DFIG 转定向电网输出容性无功功率。

### 3.4 双馈异步风力发电机的并网与运行控制

在风力发电机组的起动阶段, 需要对发电机进行并网前的调节以满足并网条件, 即发电机定子电压与电网电压在幅值、频率、相位上均需严格相同, 以使发电机实现安全并网, 迅速进入正常的发电运行状态。发电机并网是风力发电系统正常运行的“起点”, 主要要求是限制发电机并网时的瞬变电流, 避免对电网造成过大的电流冲击。当电网的容量比发电机容量大很多